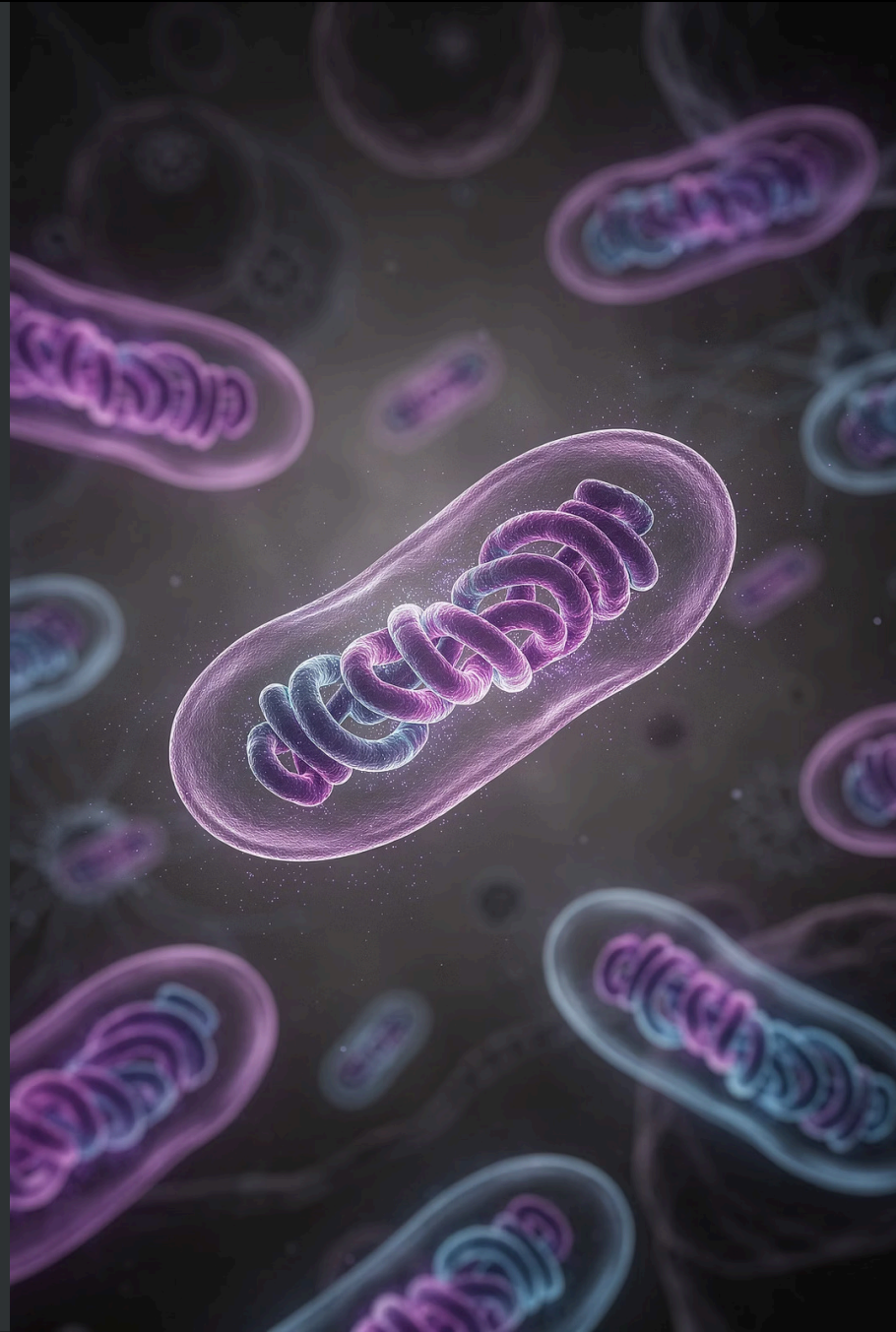
Hücrenin Enerji Fabrikası: Krebs Döngüsü ve Elektron Taşıma Sistemi

Ders Sunumu

Teradigma



Büyük Soru: Enerji Neden "Patlayarak" Değil, "Basamak Basamak" Açığa Çıkar?

Bir glikoz molekülündeki enerjinin tamamı tek anda serbest bırakılsaydı ne olurdu?

→ Kontrolsüz Isı

Ortaya çıkan enerji, kontrol edilemez bir ısıya dönüşürdü

→ Hücre Yıkımı

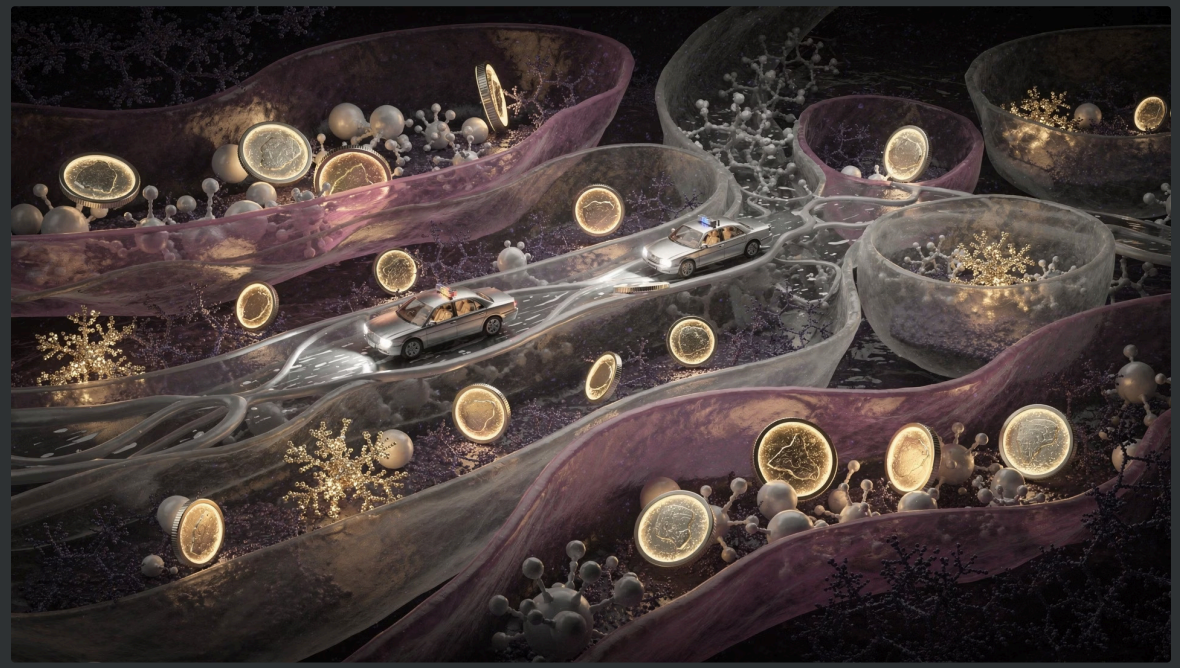
Bu durum, enerjiyi kullanması gereken hücreyi yok ederdi

→ Benzin Deposu Benzetmesi

Tıpkı arabanın benzin deposunun tümünün tek kıvılcımla patlaması gibi

> Enerjinin bir şelalenin basamaklarından iner gibi, küçük paketler hâlinde salınması için özel bir mekanizmalar zinciri kurulmuştur.

Fabrikanın Para Birimi: ATP, NADH ve FADH2



ATP (Adenozin Trifosfat)

Hücrenin evrensel enerji para birimidir; kasılma, büyüme, onarım bu parayla yapılır

NADH ve FADH2

Şarj edilebilir "enerji taksileri" gibidir; glikozun parçalanmasında açığa çıkan yüksek enerjili elektronları taşırlar

Elektron Taşıma Sistemi'ne Yolculuk

Dolu taksiler, asıl enerji üretim ünitesi olan Elektron Taşıma Sistemi'ne yol alır

Enerji Santrali: Mitokondrinin Mimarisi

Mitokondri, iki zar sisteminden oluşacak şekilde tasarlanmıştır:

Dış Zar

Düz ve geçirgen; fabrikanın dış duvarı gibidir

İç Zar (Krista)

"Krista" adı verilen binlerce kıvrıma sahiptir — bu kıvrımlar yüzey alanını devasa ölçüde artırır, böylece çok daha fazla enerji üretim makinesi yerleştirilebilir

> Bir süngerin düz bir kağıttan çok daha fazla yüzey alanına sahip olması gibi.

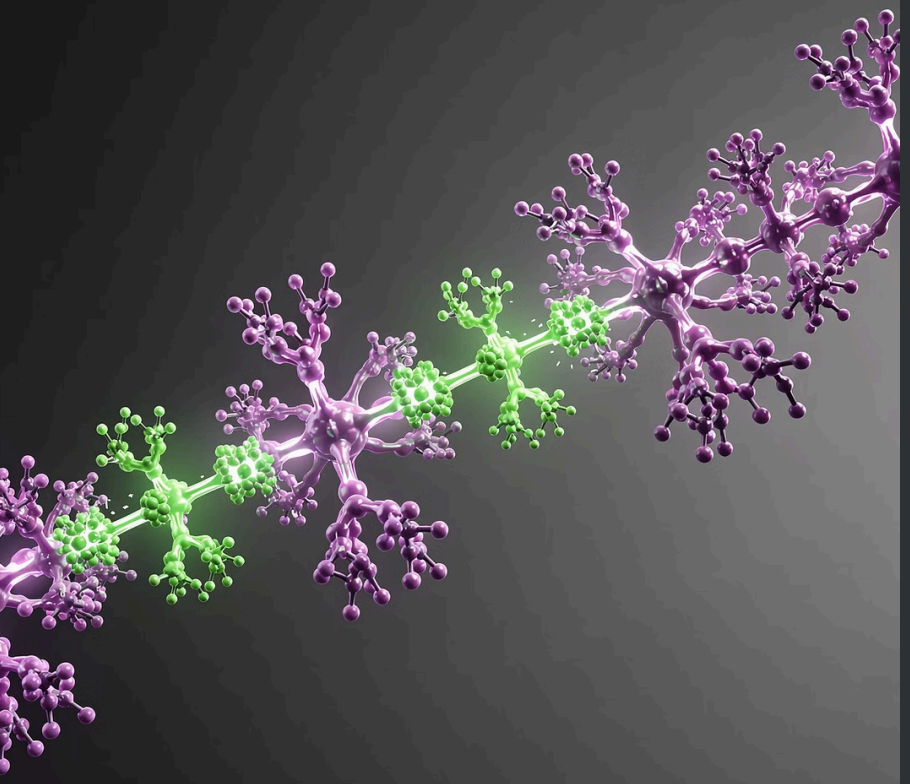
Fabrikanın Bölümleri ve Görevleri

Bu bölümlendirme olmasaydı üretilen enerji, baraj duvarları olmadan suyun etrafa dağılması gibi, boşa harcanırdı.

Matriks
En iç kısım: Krebs Döngüsü'nün gerçekleştiği hammadde işleme bölümüdür

İç Zar
Elektron Taşıma Sistemi kompleksleri ve ATP sentaz türbinleri buraya gömülüdür

Zarlararası Boşluk
Protonların biriktirildiği rezervuar görevi görür; iç zarın protonları sızdırmaz yapısı bu rezervuarı doldurmayı mümkün kılar

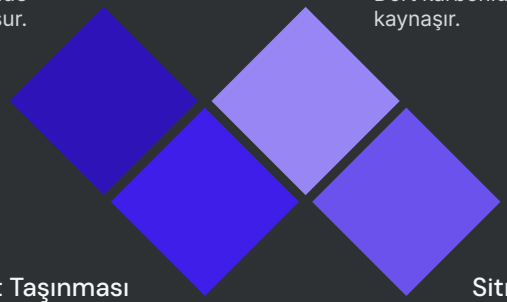


Dairesel Üretim Bandına Giriş: Hammadde Nedir?

Glikoz, önce sitoplazmada parçalanır; oluşan **pirüvat** molekülleri mitokondri matriksine taşınır.

Asetil-KoA Oluşumu
İki karbonlu hammadde oluşur.

Okzaloasetat ile Birleşme
Dört karbonlu molekül ile kaynaşır.



Pirüvat Taşınması
Pitoplazmadan matrikse taşınır.

Sitrat Oluşumu
Altı karbonlu sitrat meydana gelir.

Döngü, asetil-KoA'nın dört karbonlu okzaloasetat ile birleşmesiyle başlar. Bu birleşmeden altı karbonlu sitrat oluşur — bu yüzden döngüye "Sitrik Asit Döngüsü" da denir.

Krebs Döngüsü: Her Adımda Ne Üretilir?

Sekiz farklı enzim, sırayla şu işleri yürütür:

1 Karbon Atımı

Molekülden karbon atomları koparılır ve **CO2** olarak dışarı atılır — nefesle verdiğimiz CO2'nin kaynağı burasıdır

2 Doğrudan ATP Üretimi

Doğrudan bir miktar **ATP** (enerji parası) üretilir

3 Enerji Taksilerine Yükleme

Serbest kalan yüksek enerjili elektronlar, enerji taksilerine (**NADH ve FADH2**) yüklenir

Döngünün her tam turunda: **3 NADH, 1 FADH2, 1 ATP, 2 CO2** üretilir.

Döngünün Kendini Yenilemesi

Döngünün son adımında başlangıçtaki dört karbonlu **okzaloasetat** yeniden oluşturulur.

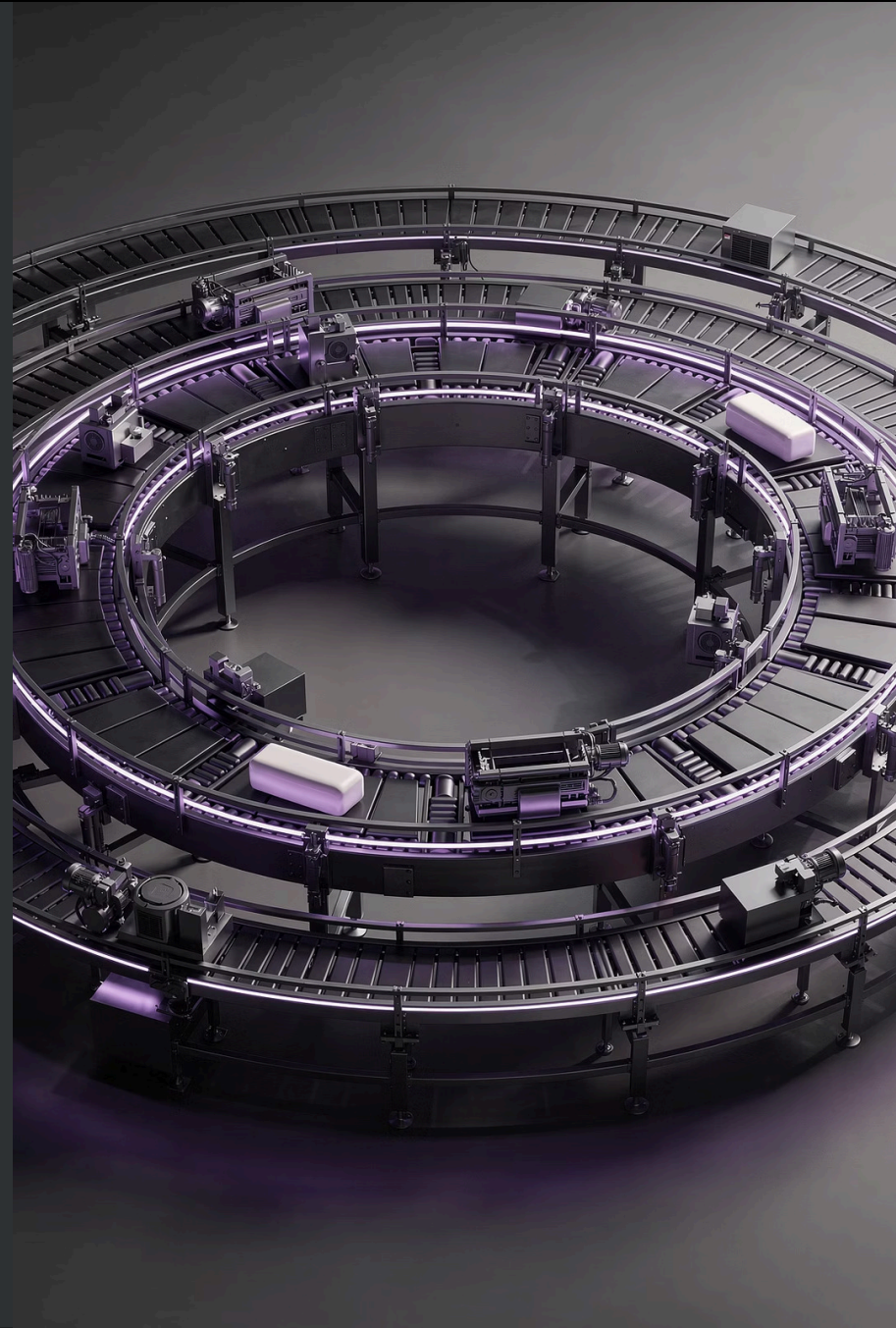
Hazır Hâle Gelme

Bu sayede üretim bandı, bir sonraki asetil-KoA hammaddesini almaya hazır hâle gelir

Kesintisiz Devam

Döngü kesintisiz devam eder

> Peki neden döngü düz bir hat değil de dairesel bir çark olacak şekilde düzenlenmiştir? Başlangıç molekülünün kendiliğinden geri üretilmesi, sürecin neden hiç durmamasını sağlar?



Krebs Döngüsü Özeti (2 Glikoz Turu)

2

ATP

Doğrudan üretilir

6

NADH

Enerji taksisi olarak doldurulur

2

FADH2

Enerji taksisi olarak doldurulur

4

CO2

Dışarı atılır

Toplam enerji çıktısı bu aşamada mütevazı görünür — esas büyük üretim bir sonraki aşamaya bırakılmıştır.

Enerji Şelalesi: Elektron Taşıma Sistemi (ETS)

Dolu enerji taksileri, iç zardaki dört büyük protein kompleksine gelir.

Her kompleks, kendisine gelenden daha güçlü bir "çekim gücüne" (redoks potansiyeli) sahip olacak şekilde sıralanmıştır — bu hassas ayar elektron akışının yönünü belirler ve asla tersine akmamasını sağlar.

Kompleks I — NADH

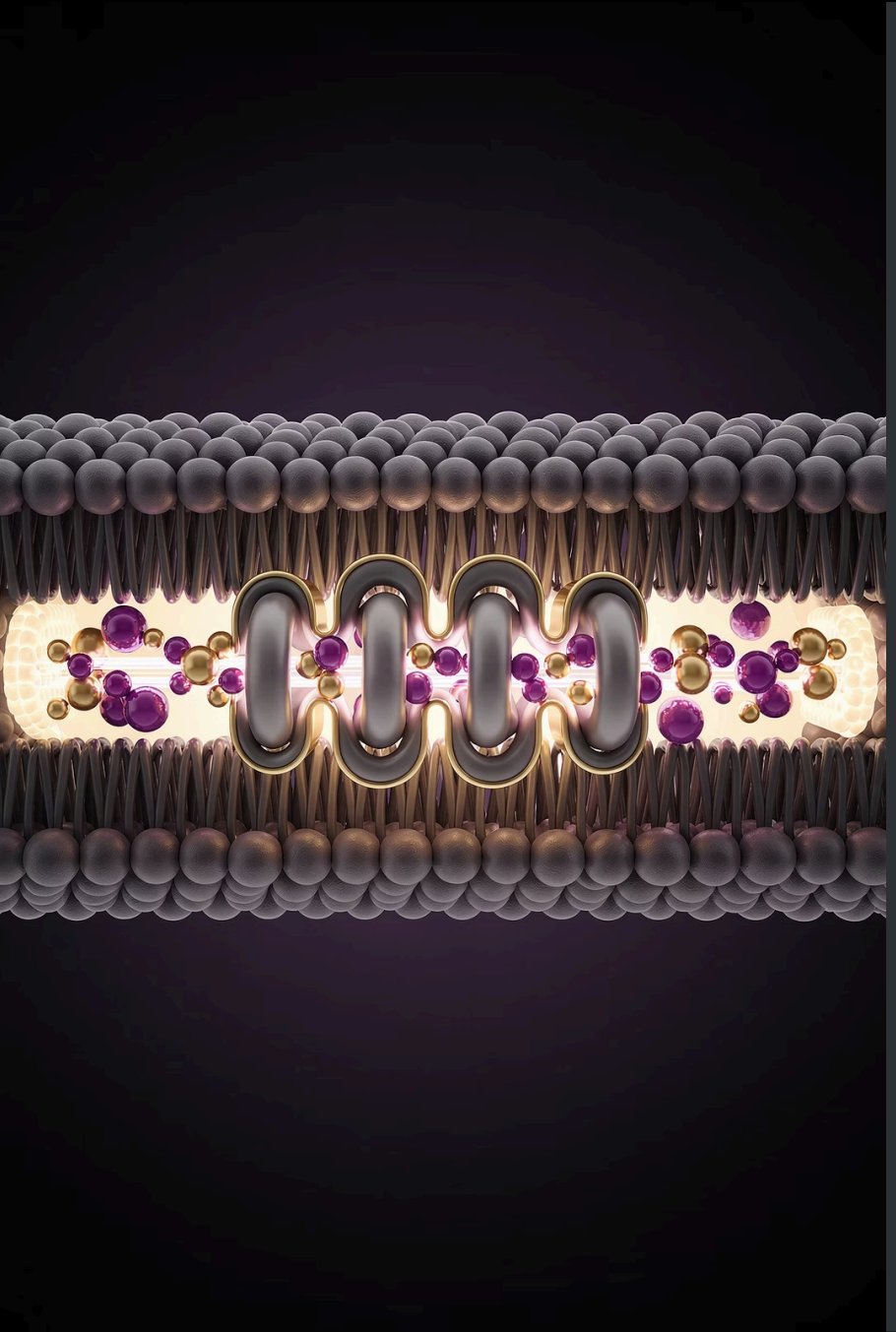
NADH elektronlarını en tepedeki Kompleks I'e bırakır

Kompleks II — FADH2

FADH2 biraz daha aşağıdaki Kompleks II'ye bırakır

Elektron Akışı

Elektronlar, yüksek enerji seviyesinden düşüğe doğru, tıpkı suyun şelaleden akması gibi aktarılır



ETS'de Enerji Ne İşe Yarar?

Elektron aktarımı sırasında açığa çıkan enerji ısıya dönüşmez; çok daha özel bir iş için kullanılır:

Proton Pompalama

Protonlar (H+ iyonları), matriksten zarlararası boşluğa **pompalanır**

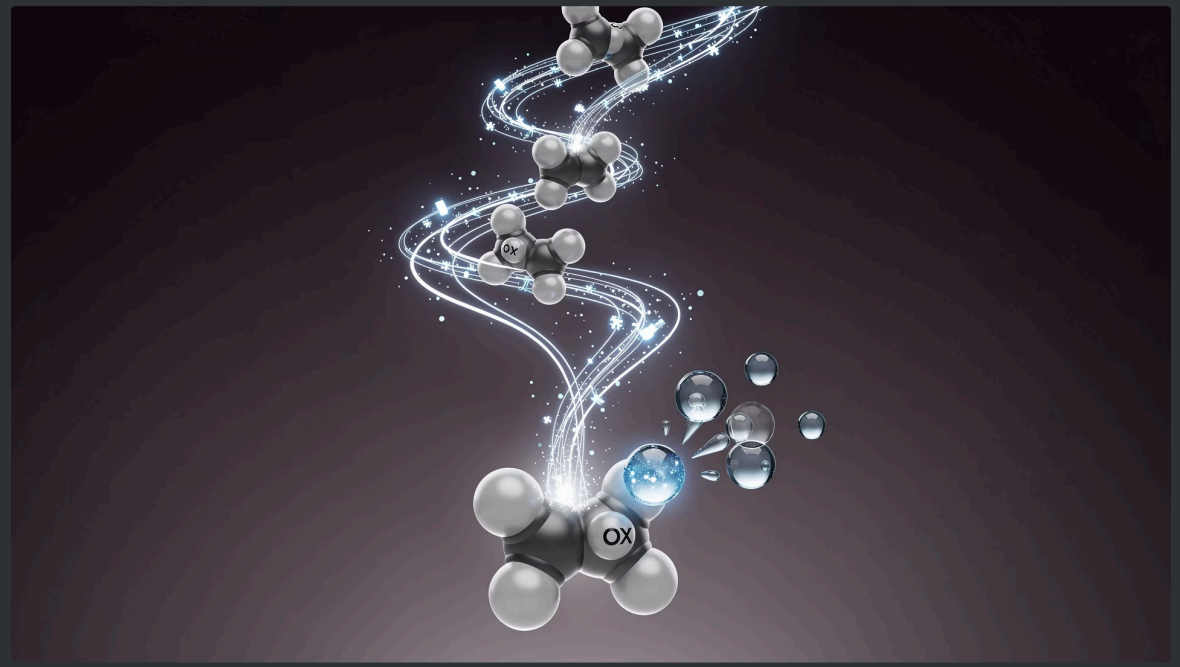
Sürekli Baskı

Her elektron geçişi bir pompanın çalışması gibidir ve boşluğa sürekli proton basar

Proton Birikimi

Zarlararası boşlukta muazzam bir **proton birikimi** oluşur

Şelalenin Sonundaki Alıcı: Oksijen



Enerjisi tükenmiş elektronları şelalenin en dibinde bekleyen bir nihai alıcı vardır: **oksijen**.

Su Oluşumu

Oksijen bu elektronları ve ortamdaki protonları alarak **su (H2O)** oluşturur

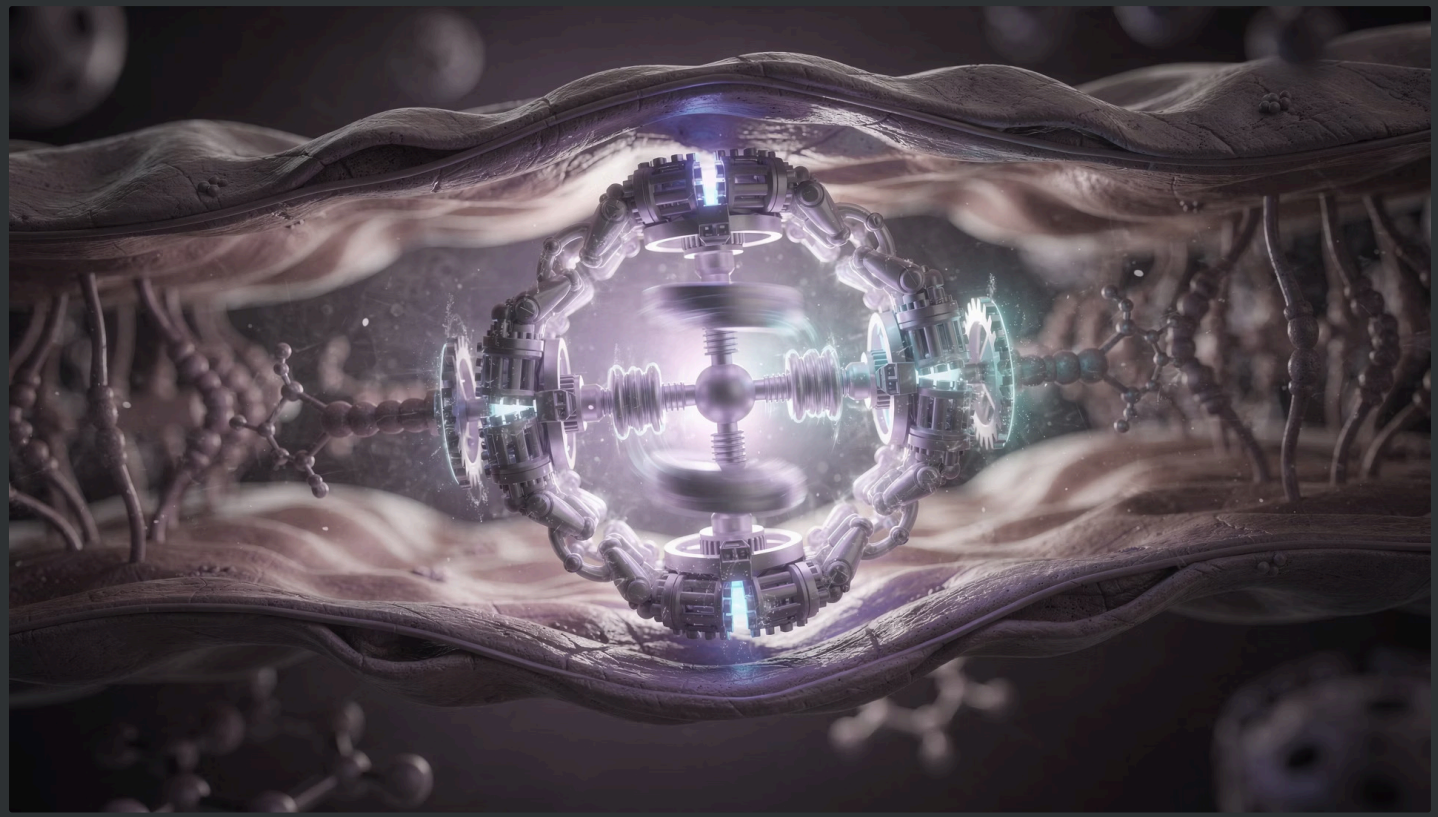
Oksijenli Solunum

Solunum sürecine "oksijenli" denmesinin sebebi budur

Kritik Rol

Oksijen olmasaydı şelalenin sonundaki gider tıkanır ve tüm sistem dururdu

Dönen Moleküler Türbin: ATP Sentaz



Zarlararası boşluktaki proton birikimi bir barajın arkasındaki su basıncı gibidir. Protonların geri dönebileceği tek geçit **ATP Sentaz**'dır.

01

Proton Akışı

Protonlar bu makinenin kanalından akarken **rotor** kısmını döndürür

02

Şekil Değişimi

Dönen rotor, katalitik kafanın şeklini değiştirir

03

Üç Katlı Dönüşüm

Bu makine gerçek bir moleküler motordur: elektrokimyasal enerjiyi → mekanik enerjiye → kimyasal bağ enerjisine dönüştürür

ATP Sentaz'ın Üç Adımlı Döngüsü

Katalitik kafa üç aşamalı bir döngüyle çalışır:

Gevşek Durum

ADP (boş enerji parası) ve fosfat molekülünü yakalar

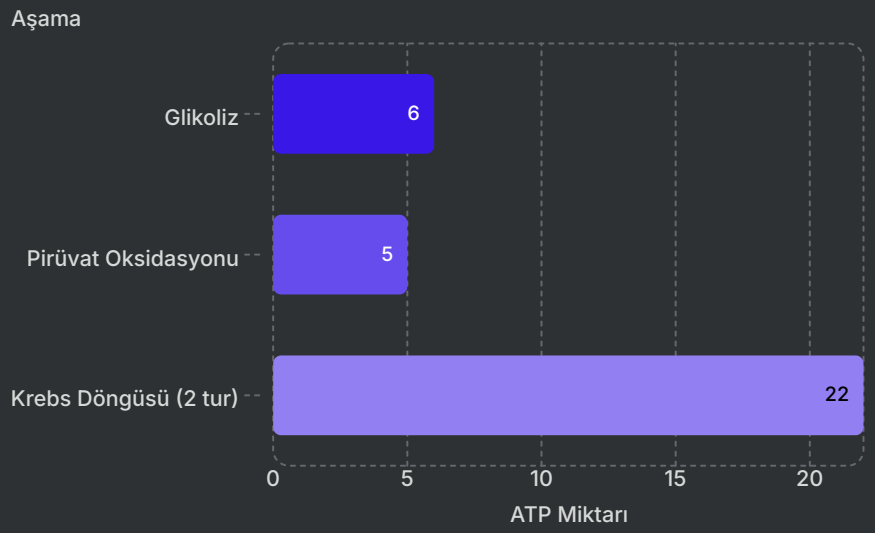
Sıkı Durum

Yakaladıklarını birbirine o kadar yaklaştırır ki aralarında kimyasal bağ oluşur → **ATP sentezlenir**

Açık Durum

Yeni üretilen ATP serbest bırakılır, döngü yeniden başlar

Tek Bir Glikozdan Elde Edilen Net ATP



1

Glikoliz (sitoplazmada)

Yaklaşık 5-7 ATP

2

Pirüvat Oksidasyonu

Yaklaşık 5 ATP

3

Krebs Döngüsü (2 tur)

Yaklaşık 22 ATP

Genel toplam: Yaklaşık **30-32 ATP**. Eski hesaplamalar 36-38 ATP belirtse de güncel bulgular, proton sızıntıları ve taşıma işlerinde kullanılan enerji nedeniyle gerçek verimin 30-32 ATP aralığında olduğunu göstermektedir.

Akıllı Güç Şebekesi: Geri Bildirimle Kontrol

Bu fabrika her zaman tam kapasiteyle çalışmaz; hücrenin anlık ihtiyacına göre hızını ayarlar:

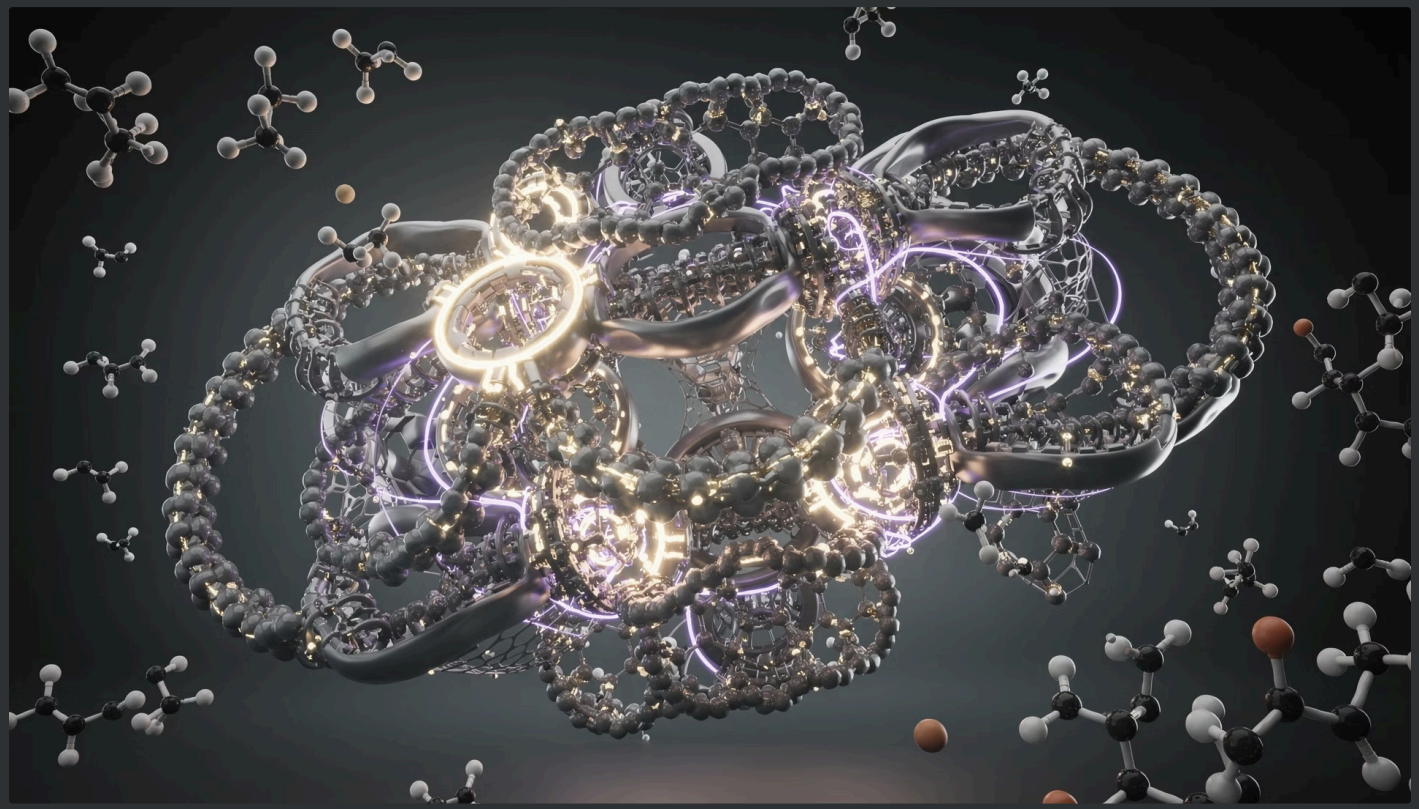
ATP Bol Olduğunda

ATP molekülleri Krebs Döngüsü'nün kilit enzimlerine bağlanarak üretimi yavaşlatır — **"Yeterince ürünümüz var"** sinyali

ATP Azaldığında

Bu düşüş **"Acil enerjiye ihtiyaç var, hızlandırın!"** sinyali olarak algılanır ve döngü hızlanır. Bu bilgiye dayalı geri bildirim sistemi, kaynakların israf edilmesini önler ve talebe göre üretim yapar.

Cansız Atomlardan Hayata: Tefekkür Noktası



Bu fabrikanın tüm parçaları — rotor, katalitik kafa, pompa kompleksleri — karbon, hidrojen, oksijen, azot gibi cansız atomlardan oluşturulmuştur.

> Tuğlalar ve harç, kendi başlarına bir saray planı çizip inşa edebilir mi?

Tek Başına Atomlar

Bu atomlar tek başlarına ne dönebilir, ne enerji üretebilir, ne de kendilerini düzenleyebilir

Nizam İçinde Tertip

Ancak belirli bir plan ve nizam dahilinde tertip edildiklerinde, parçaların hiçbirinde bulunmayan özellikler ortaya çıkar: kontrollü enerji dönüştürme, geri bildirimle kendini ayarlama, mekanik hareketle kimyasal bağ yapma

Dersin Özeti: Bir Sistemin Dört Katmanı

Krebs Döngüsü (Matriks)

Hammaddeyi işler, enerji taksilerini doldurur, CO_2 çıkarır

Elektron Taşıma Sistemi (İç Zar)

Taksilerdeki elektronları şelaleden akıtır, proton pompalar

ATP Sentaz (İç Zar)

Proton akışının mekanik enerjisini ATP'nin kimyasal enerjisine dönüştürür

Geri Bildirim Kontrolü

Tüm sistemi hücrenin anlık ihtiyacına göre ayarlar

Bu dört katman birlikte, cansız atomlardan oluşturulmuş, amaçlı ve nizam dolu bir enerji sistemini meydana getirir.